

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷



COPYRIGHTS

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



HOW TO CITE THIS ARTICLE

Faraji Sabokbar H. Spatio-temporal analysis of urban traffic patterns in metropolitan areas applying the emerging hot spot analysis (EHSA) algorithm: A short-term (one-week) analysis of online data from Tehran. *Urban Economics and Planning* 7(10):88-102.

DOI: [10.22034/uep.2026.580254.1879](https://doi.org/10.22034/uep.2026.580254.1879)

تحلیل فضایی - زمانی الگوهای ترافیکی کلان‌شهرها با استفاده از الگوریتم تحلیل نقاط داغ نوظهور (EHSA): تحلیل داده‌های آنلاین کوتاه‌مدت (یک هفته) کلانشهر تهران

حسنعلی فرجی سبکبار^{۱*}

۱. استاد گروه جغرافیای انسانی و برنامه‌ریزی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران

چکیده

هدف: شناسایی، تحلیل و مدل‌سازی الگوهای فضایی - زمانی تراکم ترافیک در کلان‌شهر تهران با استفاده از رویکرد «تحلیل نقاط داغ نوظهور» (EHSA) بر پایه مکعب فضایی - زمانی. پژوهش حاضر به دنبال پاسخ به این پرسش است که الگوی فضایی - زمانی تراکم ترافیک تهران چه ساختاری دارد و کانون‌های پرتراکم و کم‌تراکم در فضا و زمان چگونه توزیع شده‌اند.

روش‌شناسی: داده‌های ترافیکی برخط معابر تهران در بازه زمانی دوم تا نهم اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۵ (شامل ۲۵۹ مرحله ثبت با فاصله ۳۰ دقیقه‌ای) جمع‌آوری شد که حجم کل پایگاه داده به بیش از ۷/۹ میلیون رکورد رسید. پس از پیش‌پردازش و ساخت «مکعب فضایی - زمانی»، سه سطح تحلیل شامل محاسبه شاخص خودهمبستگی فضایی (I موران)، خوشه‌بندی High/Low و اجرای الگوریتم EHSA در محیط ArcGIS Pro انجام گرفت.

یافته‌ها: تحلیل‌ها نشان‌دهنده وجود خودهمبستگی فضایی مثبت و معنادار ($z\text{-score}=212.41$) در سطح اطمینان ۹۹ درصد است. الگوریتم EHSA هشت الگوی متمایز را آشکار ساخت: ۱. کانون‌های داغ: «کانون داغ پایدار» در منطقه ۱۰ و حوالی آن به عنوان بحرانی‌ترین نقطه؛ «کانون داغ تشدید» در مناطق ۲۱ و ۲۲ (نشان‌دهنده گذار به بحران)؛ و الگوهای نوسانی و پراکنده در حلقه‌های میانی. ۲. کانون‌های سرد: گسترده‌ترین الگو «سرد پراکنده» در مناطق ۲۲، ۲۰ و ۴ بود. همچنین، الگوهای «سرد تشدید» و «سرد کاهشی» در حاشیه‌های شهر شناسایی شدند. در مجموع، ترافیک تهران دارای ساختار هم‌مرکز چهارحلقه‌ای است که شدت تراکم از مرکز به پیرامون کاهش می‌یابد. نتیجه‌گیری: ترکیب داده‌های برخط با روش EHSA چارچوبی کارآمد برای پایش ترافیک فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی

تحلیل فضایی-زمانی
تراکم ترافیک شهری
نقاط داغ نوظهور (EHSA)
مکعب فضا-زمان

* نویسنده مسئول: hfaraji@ut.ac.ir

۱. مقدمه

ترافیک شهری به عنوان یکی از پدیده‌های پیچیده شهری شناخته می‌شود و همواره در کانون توجه پژوهشگران بوده و در سال‌های اخیر با پیچیده شدن مسائل حمل‌ونقل شهری و چالش‌هایی که در این زمینه با آن مواجه است، مورد توجه شاخه‌های مختلف علمی از مهندسی حمل‌ونقل، شهرسازی، علوم اجتماعی، جغرافیای شهری و علوم داده قرار گرفته است. درک الگوهای ترافیکی نیازمند تحلیل هم‌زمان دو بعد اساسی جغرافیایی یعنی بعد زمانی که تغییرات ترافیکی را برحسب ساعت‌های مختلف شبانه‌روز، ایام هفته، ماه، فصل، سال و مناسبت‌ها نشان می‌دهد و بعد مکانی که توزیع فضایی تراکم و جریان ترافیک را در سطح شهر آشکار می‌سازد. شهر تهران با جمعیتی حدود ۹ میلیون نفر، فشرده‌ترین و پیچیده‌ترین سیستم‌های ترافیکی را دارد و مطالعه آن از اهمیت علمی با پیامدهای کاربردی ویژه‌ای برخوردار است. تولید سفر در تهران تحت تأثیر جایگاه خاص اداری، آموزشی و اقتصادی و مالی کشور و نیز سکونت بخش عمده جمعیت شهری ایران حاصل می‌شود. جمعیت از طریق سیستم‌های مختلف حمل‌ونقلی به صورت شناور در بخش‌های مختلف شهر در جریان است. از سویی، شهر تهران علاوه بر جمعیت خود پذیرای جمعیت قابل توجهی است که از پیرامون به سمت مرکز تهران به عنوان قلب اقتصادی و مالی شهر حرکت می‌کنند. با پایان بازار، کسب‌وکارها، سیستم‌های اداری و اقتصادی عمدتاً از بخش مرکزی شهر به حاشیه و پیرامون حرکت می‌کند و دینامیک خاصی از الگوهای حرکتی را تولید می‌کند. از سویی، الگوی ترافیک تهران به شدت به زمان وابسته است و در ساعت‌های مختلف این الگوها ممکن است تغییر یابد. طرح ترافیک، طرح زوج و فرد به عنوان یک عامل تنظیم‌کننده و محدودیت الگوی ترافیکی شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، رخدادهای خاص مانند اعیاد و در حال حاضر اجتماعات ایران (جنگ تحمیلی رمضان) نیز الگوها را تحت تأثیر قرار داده است. تجمعات شبانه، جریانی از سفر را در شهر ایجاد می‌کند. از سویی، ترافیک تهران پیامدهای زیست‌محیطی از جمله آلودگی هوا، تولید صدا، انتشار انواع آلاینده‌ها در محیط شهری به همراه دارد و اقتصاد شهری و اقتصاد ملی را می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد. لذا شناخت الگوهای ترافیک می‌تواند در مدیریت و هدایت برنامه‌های توسعه شهری و مدیریت ترافیک شهر تهران مؤثر واقع شود. از این‌رو، با استفاده از روش‌های نوین جمع‌آوری داده‌های ثبتی غیر رسمی، داده‌های ترافیکی طی یک مدت طولانی جمع‌آوری شده‌اند که حجم عظیمی از داده‌ها را تولید کرده است. بر این اساس، داده‌های تراکم ترافیک از تاریخ ۱۴۰۵/۲/۲ تا ۱۴۰۵/۲/۹ به صورت نمونه پردازش و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است تا به این سؤال پاسخ دهیم که ترافیک شهر تهران از چه الگوی فضایی - زمانی تبعیت می‌کند؟ و آیا می‌توان الگویی کشف کرد؟ براساس این الگو آیا امکان پیش‌بینی وجود دارد؟ برای پاسخ به این سؤالات داده‌های جمع‌آوری شده مورد پردازش قرار گرفته و با استفاده از الگوسازی مکعب زمان و مکان این الگوها شناسایی شده‌اند.

۲. مبانی نظری

ترافیک شهری پدیده‌ای چندوجهی، پویا و غیرخطی است که درک آن مستلزم تحلیل هم‌زمان دو بعد بنیادین مکان و زمان است. در دهه‌های اخیر با گسترش فناوری‌های سنسور از دور، داده‌های تلفن

همراه و ثبت موقعیت افراد، دوربین‌های ترافیک شهری، انواع سنجنده‌ها و حسگرها، حجم عظیمی از داده‌های فضایی - زمانی در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است. این تحول داده‌ای، نیازمند توسعه روش‌های نوین داده‌کاوی فضایی و الگویی است که بتواند ساختارهای پنهان، روابط متقابل و پویایی‌های جریان ترافیک را آشکار سازد. الگویی فضایی - زمانی ترافیک شهری به مثابه پلی میان علوم جغرافیایی، مهندسی حمل‌ونقل، اقتصادسنجی فضایی و علوم داده عمل می‌کند و ابزاری قدرتمند برای برنامه‌ریزی، مدیریت و کنترل ترافیک در کلان‌شهرها فراهم می‌آورد.

تحرك در قلب بسیاری از چالش‌هایی قرار دارد که شهرها با آن‌ها روبه‌رو هستند (den Hoed, 2024). اصطلاح تحرك معانی متعددی دارد و در اینجا به حرکت خودرو در فضا و زمان اشاره دارد و به طور ضمنی به تحرك انسانی اشاره می‌کند (Barbosa et al., 2018). تحرك به دنبال خود پویایی و جابه‌جایی جمعیت را به همراه دارد و به تولید سفر منجر می‌شود. در یک شهر در نتیجه فرایندهای مداوم شهری، برخی مراکز تولیدکننده سفر هستند و در مقابل مراکزی وجود دارند که به جذب سفر می‌پردازند و بین این دو همواره جریانی از سفر و آمد و شد وجود دارد. البته الگو، میزان شدت و حجم این تحرك و جابه‌جایی ثابت نیست و تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرد و نوساناتی در این زمینه وجود دارد. این الگوها که به منشأ ترافیک‌های شهری شناخته می‌شوند الگوهای ترافیکی شهری را شکل می‌دهند. دیدگاه‌ها و نظریات متفاوتی در زمینه مطالعات ترافیک شهری وجود دارد و متناسب با مقاله حاضر می‌توان آن‌ها را در چند دسته قرار داد، مطالعات مربوط به جریان ترافیک و مدل‌های مربوط به تحلیل‌های زمانی - مکانی که در ادامه به برخی از آن‌ها متناسب با موضوع مقاله پرداخته می‌شود:

مدل بنیادی جریان ترافیک: مدل‌های جریان ترافیک برای درک، تبیین و پیش‌بینی جریان ترافیک از آغاز قرن ۱۹ ارائه شدند (van Wageningen-Kessels, van Lint, Vuk, & Hoogendoorn, 2015). نظریه جریان ترافیک پایه‌ای‌ترین چارچوب برای درک رفتار ترافیک است. گریشیلدز (۱۹۳۵) نخستین رابطه ریاضی میان سرعت (v)، تراکم (k) و جریان (q) را ارائه داد و نشان داد این رابطه ماهیتی خطی دارد: $q = k \times v$ در این رابطه جریان (q) براساس تعداد وسایل نقلیه در واحد زمان، تراکم (k) برحسب تعداد وسیله نقلیه در واحد طول و سرعت (v) برحسب میانگین سرعت وسیله نقلیه تعریف می‌شود.

دیاگرام بنیادین ترافیک: یکی دیگر از دیدگاه‌هایی که به مدل‌سازی ترافیک شهری می‌پردازد، دیاگرام بنیادین ترافیک (Fundamental Diagram) است که در آن رابطه میان جریان و تراکم را به صورت گرافیکی نشان می‌دهد. دگانزو (۱۹۹۴) با ارائه مدل انتقال سلولی (CTM)، این دیاگرام را به شکل دوزنقه‌ای تقریب زد که امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر موج‌های ترافیکی را فراهم می‌کند. گرولمینیس و دگانزو (۲۰۰۸) مفهوم دیاگرام بنیادین کلان‌شهری (MFD) را معرفی کردند که رابطه میان تراکم و جریان را در سطح کل شبکه شهری نشان می‌دهد. این مفهوم انقلابی در مدیریت ترافیک شهری ایجاد کرد، زیرا امکان کنترل ترافیک در مقیاس شهری را فراهم ساخت.

نظریه سه‌فاز ترافیک، که توسط بوریس اس. کرنر (Boris S. Kerner) در سال ۲۰۰۴ توسعه یافت (Boris S. Kerner, Rehborn, Aleksic, & Haug, 2004)، یک مدل نوین برای توصیف رفتار ترافیک جاده‌ای

است. این نظریه بر پایه مشاهدات تجربی از داده‌های واقعی ترافیک (مانند داده‌های بزرگراه‌های آلمان) بنا شده و ترافیک را به سه فاز اصلی تقسیم می‌کند: جریان آزاد (Free Flow)، جریان همگام (Synchronized Flow) و ترافیک گسترده (Wide Moving Jam) بخش کلیدی این نظریه، توضیح موج‌های ترافیکی (مانند ترافیک‌های گسترده) است که علت اصلی تراکم و ازدحام در جاده‌ها را توجیه می‌کند (Treiber, M., 2013). فاز جریان آزاد در نظریه سه‌فازی ترافیک، به عنوان حالتی تعریف می‌شود که وسایل نقلیه با سرعت بالا و بدون محدودیت‌های قابل توجه حرکت می‌کنند و رابطه بین جریان (q) و چگالی (p) تقریباً خطی است، با سرعت متوسط بیش از ۸۰ کیلومتر در ساعت و چگالی کمتر از ۱۵ وسیله در کیلومتر. این فاز بر پایه مشاهدات تجربی از بزرگراه‌های خلوت بنا شده و انتقال خودبه‌خودی به فاز جریان همگام ($F \rightarrow S$) زمانی رخ می‌دهد که چگالی از حد بحرانی فراتر رود، که این پدیده اغلب در گلوگاه‌ها مشاهده می‌شود و به کاهش ترافیک بزرگراه می‌انجامد (B.S. Kerner, 2004). مدل‌های ریاضی مانند دیگرام‌های اساسی نشان می‌دهند در این فاز، جریان حداکثری (q_{max}) حدود ۲۵۰۰-۲۰۰۰ وسیله در ساعت در هر خط است، و ناپایداری‌های محلی می‌تواند آغازگر انتقال فازی باشد (Treiber & Kesting, 2013). فاز جریان همگام به عنوان یک حالت واسطه توصیف می‌شود که در آن سرعت وسایل نقلیه متوسط (۴۰-۸۰ کیلومتر در ساعت) است و همگامی بین خطوط مختلف رخ می‌دهد، بدون تشکیل تراکم‌های گسترده، اما با نوسانات کم در سرعت و جریان. این فاز، که توسط کرنر بر اساس داده‌های تجربی از بزرگراه A5 آلمان معرفی شد، در دیگرام‌های اساسی به صورت یک ناحیه دوبعدی ظاهر می‌شود، جایی که جریان می‌تواند در محدوده وسیعی نوسان یابد بدون وابستگی مستقیم به چگالی (۲۰-۵۰ وسیله در کیلومتر)، و اغلب پیش‌زمینه‌ای برای تشکیل موج‌های ترافیکی است (B.S. Kerner, 2004). مطالعات نشان می‌دهند این فاز علت اصلی کاهش ظرفیت در ترافیک شهری است و مدل‌های میکروسکوپی می‌توانند رفتار آن را شبیه‌سازی کنند (Treiber & Kesting, 2013). فاز ترافیک گسترده شامل موج‌های متحرک پایدار با چگالی بالا (بیش از ۵۰ وسیله در کیلومتر) و سرعت نزدیک به صفر داخل موج است، که این موج‌ها با سرعت ثابت تقریبی ۱۵ کیلومتر در ساعت به سمت عقب پخش می‌شوند و می‌توانند بدون اختلال خارجی حفظ شوند. کرنر این فاز را به عنوان یک پدیده خودپایدار توصیف می‌کند که اغلب از فاز همگام ناشی می‌شود و در مدل‌های ماکروسکوپی با معادلات موج شوک توضیح داده می‌شود، جایی که پایداری موج بر پایه داده‌های تجربی تأیید شده است (B.S. Kerner, 2004). این فاز تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت کلی بزرگراه دارد و در شبیه‌سازی‌ها برای پیش‌بینی تراکم‌های طولانی‌مدت استفاده می‌شود (B.S. Kerner, 2002).

نظریه مکعب زمان - مکان (Space-Time Cube) که توسط هاگستراند مطرح شد (Hägerstraand, 1970)، بر این ایده استوار است که هر رخداد انسانی (و به تبع آن، هر الگوی رفتاری در سطح شهر) را می‌توان به صورت هم‌زمان در دو بعد فضایی و یک بعد زمانی تحلیل کرد. در این چارچوب نوین، مسیر حرکت افراد با جریان‌ها در شهر فقط «در یک مکان» یا «در یک زمان» خلاصه نمی‌شود، بلکه به شکل یک موجودیت سه‌بعدی دیده می‌شود که در آن، تغییرات زمانی به طور ساختاریافته در امتداد محور زمان رخ می‌دهد و موقعیت‌ها در امتداد محورهای فضایی ثبت می‌شوند

(Hägerstraand, 1970) بر اساس این نگاه نظری، ترافیک شهری می‌تواند به عنوان مجموعه‌ای از حرکت‌ها و تعامل‌های فضای - زمانی در نظر گرفته شود: وسایل نقلیه، گروه‌های راننده، مسافر و حتی جریان‌های پیوندخورده به زمان‌های خاص (مانند ساعت‌های اوج یا رویدادهای شهری)، همگی در یک فضای جغرافیایی مشخص و در بازه‌های زمانی معین اتفاق می‌افتند (Hägerstraand, 1970). بنابراین، مدل‌سازی دقیق ترافیک تنها زمانی میسر است که بتواند هم‌زمان الگوی فضایی و الگوی زمانی را در کنار یکدیگر بازنمایی کند. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند تلفیق داده‌های مکانی - زمانی با مدل‌های پیشرفته محاسباتی می‌تواند چارچوبی کارآمد و مقیاس‌پذیر برای پیش‌بینی و تحلیل ترافیک شهری فراهم آورد (Boris S. Kerner et al., 2004; Mohammed, Alkhereibi, Abulibdeh, Jawarneh, & Balakrishnan, 2023; Soltani & Roohani Qadikolaei, 2024). به طور خاص، ساختارهای مکانی - زمانی مبتنی بر گراف‌های کانولوشنی (Graph Convolutional Networks) و شبکه‌های عصبی زمانی توانایی بالایی در ثبت وابستگی‌های پیچیده زمانی و مکانی دارند (Komarovskiy & Haddad, 2025; Zhang et al., 2025; Zhu, Zhang, Jian, & Yang, 2025).

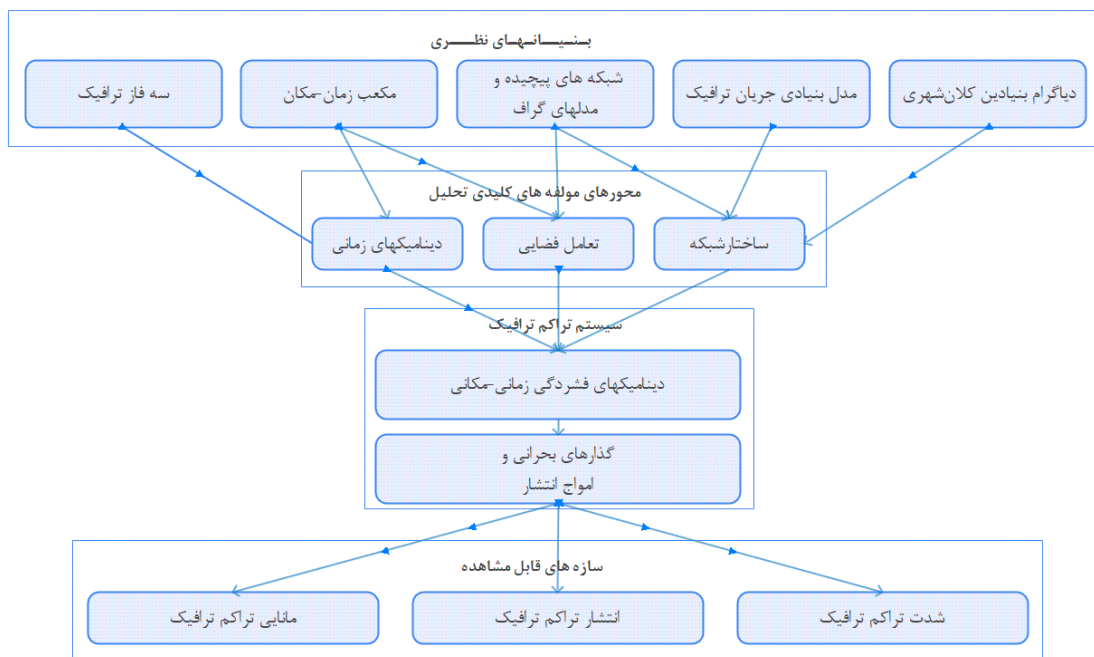
با توجه به موضوع تحقیق، لازم است تعریفی علمی و مشخص از الگو و الگویابی فضایی - زمانی ارائه دهیم. الگو (Pattern) در علوم داده به معنای ساختار تکرارشونده، قاعده‌مند یا معنادار در داده‌ها است. هان و همکاران الگو را به عنوان «مجموعه‌ای از روابط میان متغیرها که به صورت مکرر و با احتمال قابل توجه در داده‌ها ظاهر می‌شود» تعریف می‌کنند (Han, Kamber, & Pei., 2011). این تعریف به‌ویژه مفید برای درک الگوهای ترافیکی است، زیرا ترافیک شهری خود مجموعه‌ای از رفتارهای تکرارشونده و قابل پیش‌بینی است. در حوزه ترافیک شهری، الگوها را می‌توان در سه سطح طبقه‌بندی کرد: الگوهای زمانی: تغییرات ترافیک طی روز، هفته یا فصل‌ها، الگوهای مکانی: توزیع تراکم در نقاط مختلف شبکه خیابانی، الگوهای زمانی - مکانی: تعامل پویای تراکم در مکان‌ها و زمان‌های مختلف (Cheng, Haworth, Anbaroglu, Tanaksaranond, & Wang, 2014). با توجه به آنچه اشاره شد، الگویابی فضایی - زمانی را می‌توان این‌گونه تعریف کرد: «فرایند کشف دانش جدید، غیربدیهی و بالقوه مفید از مجموعه داده‌های بزرگ با مختصات فضایی و زمانی». در حوزه ترافیک شهری، این فرایند شامل کشف موارد زیر است (Shekhar et al., 2015):

- خوشه‌های فضایی: گروه‌بندی مناطق با رفتار ترافیکی مشابه
- نقاط: مناطق با تراکم غیرعادی ترافیک
- قواعد انجمنی: روابط میان پدیده‌های ترافیکی مختلف
- سری‌های زمانی مشابه: شناسایی بخش‌های معبر با الگوی زمانی یکسان
- ناهنجاری‌ها: انحراف از الگوی معمول
- موج‌های ترافیکی: انتشار تراکم در شبکه خیابانی

با توجه به آنچه اشاره شد، می‌توان چنین نتیجه گرفت که الگویابی زمانی - مکانی ترافیک شهری نه یک رویکرد تک‌بعدی، بلکه حاصل تلاقی و تکامل تدریجی چندین جریان نظری و روش‌شناختی است. از معادله بنیادین گرینشیلدز که نخستین چارچوب ریاضی برای توصیف رابطه میان سرعت، تراکم و جریان را فراهم آورد، تا دیگرام بنیادین کلان‌شهری که امکان تحلیل ترافیک را در مقیاس شبکه‌ای فراهم ساخت، و نظریه سه‌فازی کرنر که پیچیدگی‌های ترافیک را

الگویابی فضایی - زمانی در علوم داده، در مجموع یک چارچوب نظری منسجم و چندلایه را شکل می‌دهند که در آن ترافیک شهری نه صرفاً به عنوان یک جریان فیزیکی، بلکه به عنوان پدیده‌ای فضایی - زمانی با ساختارهای پنهان، الگوهای تکرار شونده و ناهنجاری‌های قابل کشف تعریف می‌شود که در این تحقیق مبنای کار است.

در قالب فازهای آزاد، همگام و گسترده تبیین کرد، همگی زمینه نظری قوی را برای درک ماهیت غیرخطی و پویای جریان ترافیک فراهم آورده‌اند. این چارچوب‌های کمی، در کنار نظریه مکعب زمان - مکان هاگستراند (۱۹۷۰) که تحلیل هم‌زمان مکان و زمان را به عنوان یک ضرورت بنیادین مطرح ساخت، و تعاریف دقیق الگو و



شکل ۱. چارچوب نظری الگویابی تراکم ترافیک شهری تهران

شبکه است؛ پویایی زمانی به چرخه‌های زمانی، ریتم‌های روزانه و هفتگی، و گذارهای بحرانی سامانه اشاره دارد و تعامل فضایی بازتاب‌دهنده انتشار مکانی تراکم، اثرات مجاورت و وابستگی فضایی میان قطعات شبکه است. در ادامه، این دینامیک می‌تواند به گذارهای بحرانی و امواج انتشار تراکم منجر شود که در ادبیات پیچیدگی، نظریه تراوش (Percolation Theory) و نظریه آشناری شبکه‌ها قابل تبیین است.

در لایه نهایی، این سازوکارهای نظری در قالب سه سازه مشاهده‌پذیر عملیاتی شده‌اند: شدت تراکم ترافیک، گستردگی و مانایی ترافیک و انتشار شبکه‌ای. شدت تراکم بیانگر بزرگی یا دامنه اختلال ترافیکی است؛ گستردگی و مانایی تراکم استمرار زمانی وضعیت ترافیک را نشان می‌دهد و انتشار این ساختار مفهومی در آن است که میان سنت کلاسیک نظریه جریان، پارادایم فضایی - زمانی و رویکرد شبکه‌های پیچیده پیوند برقرار می‌کند و از این طریق بستری نظری برای تحلیل داده‌های برداری - شبکه‌ای تهران با تفکیک زمانی بالا فراهم می‌آورد. در واقع این دیگرام، چارچوبی تلفیقی ارائه می‌کند که در آن ترافیک شهری نه فقط به عنوان جریان، بلکه به عنوان سامانه پیچیده فضایی - زمانی مدل‌سازی می‌شود؛ رویکردی که برای مطالعه شبکه معابر تهران، به‌ویژه با داده‌های نیم‌ساعتی و پیوند مبنای نظری و عملیاتی قدرتمندی فراهم می‌سازد.

چارچوب نظری ترسیم‌شده (شکل ۱) بر این فرض نظری استوار است که تراکم و یا ازدحام ترافیکی نه یک پیامد ساده افزایش حجم تردد، بلکه برآیند برهم‌کنش چندلایه میان ساختار شبکه، پویایی‌های زمانی و تعاملات فضایی است. در لایه نخست، بنیان‌های نظری جریان ترافیک، شامل رابطه کلاسیک جریان - تراکم - سرعت گرینشیلدز، دیگرام بنیادین کلان‌شهری و نظریه سه‌فازی کرنر، بنیان مفهومی رفتار ترافیک را در قالب ظرفیت، ناپایداری، گذارهای فازی و تشکیل موج‌های تراکم فراهم می‌کنند. در این چارچوب، ازدحام به مثابه پدیده‌ای نوظهور (emergent) تلقی می‌شود که از تعامل غیرخطی میان اجزای شبکه پدیدار می‌شود و فقط تابع تقاضای ترافیکی نیست. هم‌زمان، نظریه مکعب زمان - مکان هاگستراند بعد فضایی - زمانی این پدیده را صورت‌بندی می‌کند و نشان می‌دهد جریان‌های ترافیکی باید به صورت مسیرهای پویا در پیوستار مکان - زمان تحلیل شوند، نه به عنوان رخدادهایی ایستا. افزوده شدن رویکرد شبکه‌های پیچیده و مدل‌های گراف‌منا نیز این امکان را فراهم می‌آورد که وابستگی‌های توپولوژیک شبکه، اثر گلوگاه‌ها، مسیرهای بحرانی و انتشار آشناری اختلال‌ها در مدل لحاظ شوند.

بر پایه این بنیان نظری، دیگرام سه سازه تحلیلی اصلی - ساختار شبکه، پویایی زمانی و تعامل فضایی را به عنوان ابعاد مکنون تولیدکننده دینامیک تراکم معرفی می‌کند. ساختار شبکه نمایانگر ویژگی‌های توپولوژیک معابر، مرکزیت گره‌ها، ظرفیت پیوندهای

۳. مرور منابع و ادبیات تحقیق

ترافیک شهری در کلان‌شهری نظیر تهران، به عنوان یکی از پدیده‌های پیچیده فضایی - زمانی، همواره مورد توجه پژوهشگران حوزه‌های مختلف از جمله حمل‌ونقل، شهرسازی و هوش مصنوعی بوده است. مرور نظام‌مند ادبیات پژوهشی نشان می‌دهد مطالعات انجام‌شده در این حوزه عمدتاً در دو جریان روش‌شناختی متمایز طبقه‌بندی می‌شوند: جریان اول مبتنی بر مدل‌سازی سری‌های زمانی برای پیش‌بینی رفتار ترافیکی، و جریان دوم متمرکز بر تحلیل‌های توصیفی و خوشه‌بندی مکانی برای شناسایی نقاط پرترافیک. با بررسی انتقادی این رویکردها، می‌توان به شکاف‌های روش‌شناختی دست یافت که پژوهش حاضر با بهره‌گیری از الگوریتم تحلیل نقاط داغ نوظهور (EHS) و ساختار مکعب فضایی - زمانی، قصد دارد آن‌ها را مرتفع سازد. در جریان نخست، پژوهشگران بر استخراج داده‌های پویا و مدل‌سازی روندهای زمانی تأکید داشته‌اند. رضایی و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از داده‌های آنلاین پلتفرم MapBox، متغیرهای کلیدی همچون حجم ترافیک، سرعت و زمان سفر را در معابر تهران جمع‌آوری و با استفاده از مدل‌های ARIMA و SARIMA مدل‌سازی کردند. یافته‌های آن‌ها بیانگر توانایی بالای این مدل‌ها در شبیه‌سازی روندهای دوره‌ای و زمانی است؛ به طوری که ضریب میانگین متحرک معناداری نشان داد. همچنین، نوری و مسگری (۲۰۲۶) با استفاده از تصاویر و داده‌های تصویری گوگل، به پیش‌بینی وضعیت ترافیک برای بهینه‌سازی مسیریابی پرداختند. اگرچه این مطالعات در تبیین الگوهای زمانی و پیش‌بینی دقیق مقادیر موفق بوده‌اند، اما محدودیت ذاتی آن‌ها غفلت از بعد فضایی - مکانی و تعاملات میان نواحی مختلف شهر است. مدل‌های سری زمانی معمولاً تک‌مکانی بوده و نمی‌توانند پدیده‌های پیچیده‌ای نظیر گسترش یا تخلیه ترافیک از یک منطقه به منطقه دیگر را به صورت یکپارچه تحلیل کنند. در جریان دوم، پژوهش‌ها بر شناسایی کانون‌های ترافیکی در برش‌های زمانی خاص متمرکز بوده‌اند. شریعت‌مهری (۲۰۲۳) با استفاده از سرویس نقشه گوگل، شاخص ازدحام ترافیک را در ۱۱۷ ناحیه شهر تهران محاسبه کردند. آن‌ها با کاربرد شاخص Getis-Ord G_i^* و آزمون کروسکال - والیس، خوشه‌های پرترافیک را در ساعات‌های اوج صبح و غرب (با اطمینان ۹۰ درصد) شناسایی کردند. اگرچه این روش در ترسیم نقشه‌های ایستا از ترافیک کارآمد است، اما ماهیت ایستای شاخص Getis-Ord اجازه نمی‌دهد تا پویایی و سیر تحول کانون‌های ترافیکی طی زمان مورد بررسی قرار گیرد. به بیان دیگر، این رویکرد تنها به تشخیص «نقطه داغ» اکتفا می‌کند و نمی‌تواند تمایز دقیقی میان «نقطه داغ پایدار»، «تشدیدشونده» یا «نوظهور» قائل شود تمایزی که برای تدوین سیاست‌های پیشگیرانه و مدیریتی حیاتی است. بررسی تطبیقی مطالعات پیشین، سه شکاف پژوهشی اساسی را آشکار می‌سازد: نخست، جدایی بعد زمان از فضا در مدل‌های موجود؛ دوم، عدم توانایی در شناسایی الگوهای نوظهور و روند تغییرات (روند کاهشی یا افزایشی) کانون‌های ترافیکی؛ و سوم، محدودیت در مدل‌سازی کلان‌داده‌های برداری با حجم بالا. پژوهش حاضر با درک این خلأها، از رویکرد مکعب فضایی - زمانی استفاده می‌کند. این ساختار داده‌ای، داده‌های برداری عظیم (شامل بیش از ۷/۹ میلیون رکورد) را در یک چارچوب سه‌بعدی یکپارچه می‌سازد و بستر لازم را برای اعمال الگوریتم EHS فراهم می‌آورد. روش EHS به خلاف

روش‌های ایستای پیشین، با محاسبه تغییرات طی زمان، نه تنها مکان و زمان ترافیک سنگین را نشان می‌دهد، بلکه هشت الگوی متمایز فضایی - زمانی (شامل پایداری، تشدید، کاهش، نوسان و...) را استخراج می‌کند. این رویکرد تحلیلی، ابزاری قدرتمند برای درک «چگونگی» و «چرایی» تغییرات ترافیکی ارائه می‌دهد و به مدیران شهری اجازه می‌دهد تا به جای واکنش‌های لحظه‌ای، استراتژی‌های پیشگیرانه‌ای برای مدیریت نقاطی که در آستانه بحران ترافیکی (نقاط تشدیدشونده) قرار دارند، تدوین کنند. بنابراین، جایگاه روش حاضر در ادبیات پژوهش، گذار از تحلیل‌های توصیفی - ایستا به تحلیل‌های پویا - پیش‌بینانه است که می‌تواند چارچوبی نوین برای پایش و مدیریت هوشمند ترافیک کلان‌شهری فراهم آورد.

۴. روش‌شناسی

۴.۱. تحلیل نقاط داغ نوظهور (Emerging Hot Spot Analysis - EHS)

در مرحله نهایی تحلیل فضایی - زمانی، از الگوریتم تحلیل نقاط داغ نوظهور استفاده شد. این الگوریتم، ترکیبی از دو روش آماره فضایی G_i^* گتیس ارد برای سنجش خوشه‌بندی فضایی در هر گام زمانی، و آزمون ناپارامتریک من کندیال برای شناسایی روند معنادار در سری زمانی مقادیر G_i^* هر سلول فضایی (Ord & Getis, 1995). آماره G_i^* برای هر سلول از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Cillis, 2024):

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2}{n-1}}}$$

که در آن X_i مقدار خصوصیت عارضه Z و w_{ij} وزن فضایی بین عارضه i و j تعداد عوارض است و $\bar{X}$ میانگین کل و انحراف معیار نمونه است. مقدار G_i^* مثبت و معنادار نشان‌دهنده خوشه‌بندی مقادیر بالا (کانون داغ) و مقدار منفی و معنادار نشان‌دهنده خوشه‌بندی مقادیر پایین (کانون سرد) است (Getis & Ord, 1992; Mitchell, 2009). در گام بعد، آزمون من کندیال روند تغییرات سری زمانی G_i^* را برای هر سلول در طول ۲۴۵ گام زمانی ارزیابی می‌کند. این آزمون که فرض صفر آن نبود روند یکنواخت است، بر اساس آماره S به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

که در آن sgn تابع علامت و x_j و x_k مقادیر G_i^* در گام‌های زمانی j و k هستند. ترکیب نتیجه آماره G_i^* معنادار یا غیرمعنادار بودن در هر k (time step) گام زمانی با نتیجه آزمون من کندیال (وجود داشتن یا نداشتن روند و جهت آن)، مبنای طبقه‌بندی هر سلول فضایی در یکی از ۱۷ الگوی استاندارد EHS قرار می‌گیرد که در این پژوهش ۸ الگوی فعال در داده‌های ترافیکی تهران شناسایی شد آستانه معناداری در تمام تحلیل‌ها روی سطح اطمینان ۹۵ درصد ($p < 0.05$) تنظیم شد (Peng, Shen, Cui, Cheng, & Li, 2019) و ماتریس وزن فضایی بر اساس همسایگی وزیر تعریف شد، که با ماهیت شبکه‌ای داده‌های معابر شهری سازگاری روش‌شناختی دارد (Anselin, 1995).

۲.۴. مراحل انجام تحقیق

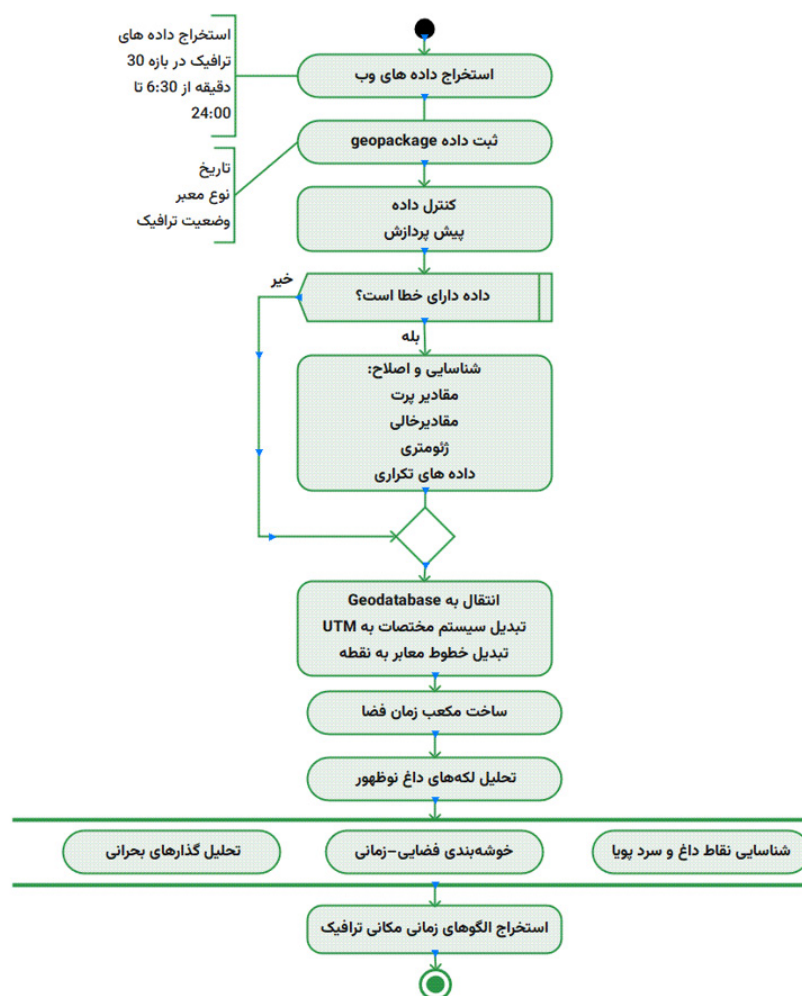
توجه به ماهیت داده‌های برخط، مقادیر مفقودشده، داده‌های پرت، خطاهای ثبت، داده‌های ناقص و ناسازگاری‌های زمانی اجتناب‌ناپذیر است. از این‌رو فرایند پاک‌سازی داده شامل شناسایی و اصلاح خطاها، حذف یا بازسازی داده‌های گمشده، کنترل دامنه منطقی متغیرها و استانداردسازی سری‌های زمانی انجام شد. این مرحله نقش مهمی در تضمین اعتبار تحلیلی داده‌ها دارد.

در مرحله چهارم، داده‌های خطی شبکه معابر به داده‌های نقطه‌ای تبدیل شدند تا امکان تحلیل در چارچوب مکعب زمان - مکان فراهم شود. این تبدیل، از طریق استخراج نقاط مرکز هر قطعه شبکه صورت گرفت و هر نقطه با مختصات مکانی و برچسب زمانی و وضعیت ترافیک و نوع معبر متناظر غنی شد. سپس، ساختار مکعب زمان مکان ایجاد شد.

در مرحله پنجم، تحلیل فضایی - زمانی ترافیک بر مبنای مکعب زمان - مکان انجام می‌شود. در این بخش، الگوهای فضایی شدت تراکم، گستردگی و مانایی زمانی تراکم و الگوی انتشار شبکه‌ای ترافیک تحلیل شد. این مرحله از طریق خوشه‌بندی فضایی - زمانی، شناسایی نقاط داغ و سرد پویا، تحلیل گذارهای بحرانی انجام شد. خروجی این مرحله، استخراج الگوهای فضایی - زمانی تراکم ترافیک و تبیین رفتار شبکه ترافیکی تهران است.

روش‌شناسی این پژوهش مبتنی بر یک فرایند چندمرحله‌ای برای استخراج، سازماندهی، پالایش، بازنمایی و تحلیل داده‌های فضایی - زمانی ترافیک شهر تهران است. در مرحله نخست، داده‌های خام ترافیکی از بسترهای وب و سامانه‌های برخط ترافیکی استخراج شدند. در این مرحله، داده‌های شبکه معابر شامل نوع معبر، وضعیت تراکم ترافیکی و زمان با تفکیک حدود نیم‌ساعتی برای یک دوره هفت‌روزه از تاریخ ۱۴۰۵/۲/۲ تا ۱۴۰۵/۲/۹ از ساعت ۶:۳۰ دقیقه بامداد تا ۲۴ گردآوری شد. ساعت‌های نیمه‌شب (۰۰:۰۰ تا ۰۶:۳۰) پیش از ساخت مکعب فضایی - زمانی، در مرحله پیش‌پردازش به طور کامل از پایگاه داده حذف شدند. این حذف آگاهانه و ساختاری است و نه به معنای رها کردن سلول‌های خالی در مکعب. در نتیجه، مکعب ساخته‌شده فقط شامل ۲۴۵ گام زمانی فعال است و هیچ سلول خالی (null) مرتبط با ساعت‌های شبانه در آن وجود ندارد. این مرحله، زیربنای تولید کلان داده ترافیکی پژوهش را فراهم می‌کند. در مرحله دوم، داده‌های استخراج‌شده در قالب یک پایگاه داده ساخت‌یافته geopackage ذخیره و سازماندهی شدند داده‌ها در مرحله بعد برای سازماندهی و آماده‌سازی داده‌ها برای کار با نرم‌افزار arcgis pro تبدیل به geodatabase شد.

مرحله سوم به کنترل کیفیت داده و پیش‌پردازش اختصاص دارد. با



شکل ۲. فرایند انجام تحقیق

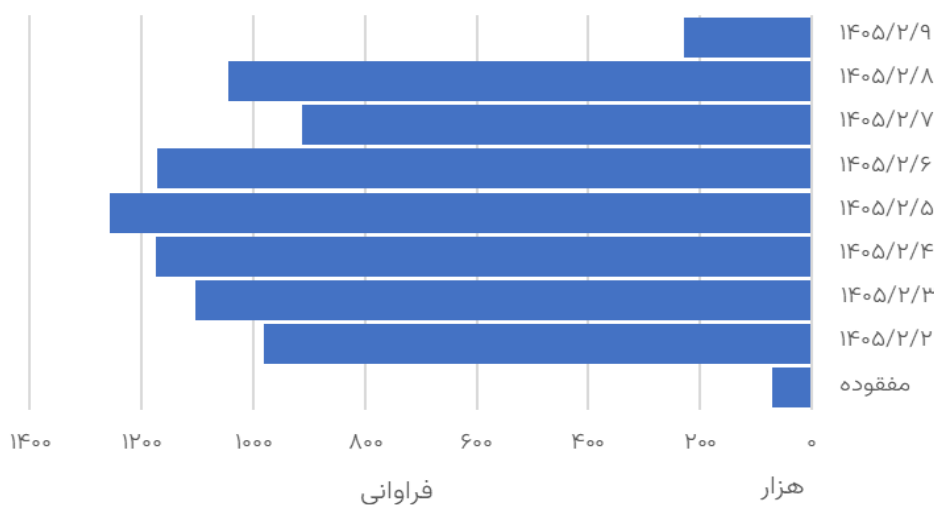
۵. یافته‌ها

روز ۹۸۴ هزار مورد با انحراف معیار ۳۲۵ هزار ثبت شده است. جدول ۱ توزیع نمونه‌ها را طی دوره یادشده نشان می‌دهد. تفاوت در تعداد نمونه‌های ترافیکی تحت تأثیر کیفیت اینترنت و حجم ترافیک است. در مواردی که حجم ترافیک زیاد باشد، تعداد معبرهای بیشتری ثبت می‌شود و حدود ۳۲ هزار نمونه را ثبت می‌کند.

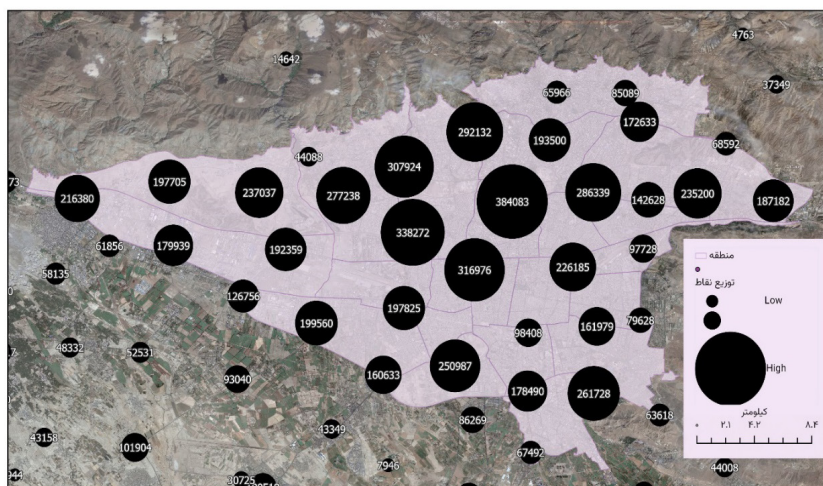
در این تحقیق، ۲۵۹ دفعه در بازه‌های تقریباً ۳۰ دقیقه، ثبت داده‌های ترافیک شهر تهران طی دوره زمانی ۱۴۰۵/۲/۲ تا ۱۴۰۵/۲/۹ انجام شده و در هر مرحله به طور متوسط اطلاعات ترافیکی ۳۰۶۶۷ معبر ثبت شده است. در مجموع، ۷۹۴۵۳۹۶ نمونه ترافیکی ثبت شده است. با توجه به تعداد روزهای تحقیق به طور متوسط در هر

جدول ۱. توزیع نمونه‌های ثبت‌شده طی دوره زمانی ۱۴۰۵/۲/۲ تا ۱۴۰۵/۲/۹

روز	داده مفقوده	۱۴۰۵/۲/۲	۱۴۰۵/۲/۳	۱۴۰۵/۲/۴	۱۴۰۵/۲/۵	۱۴۰۵/۲/۶	۱۴۰۵/۲/۷	۱۴۰۵/۲/۸	۱۴۰۵/۲/۹
فراوانی	۷۰۱۶۶	۹۸۰۲۴۳	۱۱۰۲۸۱۱	۱۱۷۴۸۲۱	۱۲۵۸۱۱۰	۱۱۷۳۱۲۱	۹۱۳۵۱۱	۱۰۴۴۴۰۳	۲۲۸۲۱۰



شکل ۳. تعداد نمونه‌های ثبت‌شده طی دوره زمانی ۱۴۰۵/۲/۲ تا ۱۴۰۵/۲/۹



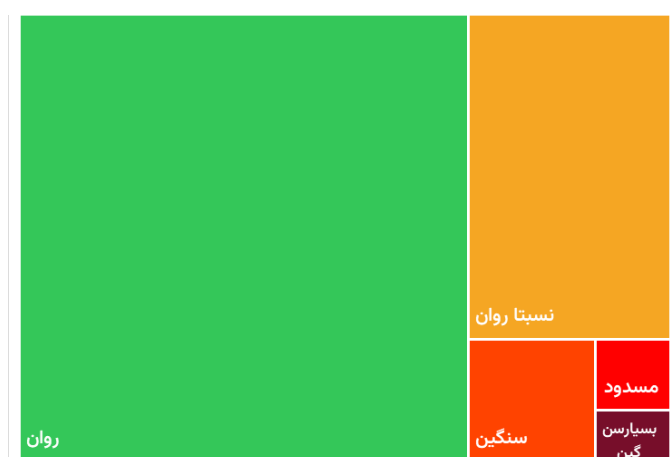
شکل ۴. توزیع جغرافیایی نقاط ترافیکی نمونه طی دوره زمانی ۱۴۰۵/۲/۲ تا ۱۴۰۵/۲/۹

سطح شهر تهران نشان می‌دهد. بخش‌های مرکزی در جهت شمال تهران تعداد نمونه‌ها بیشتر است.

برای تحلیل و مدل سازی فضایی لازم است که داده های خطی معابر به نقطه تبدیل شود، شکل ۴ توزیع فضایی تعداد نقاط را در

جدول ۲. وضعیت ترافیک معابر شهر تهران طی دوره زمانی ۱۴۰۵/۲/۲ تا ۱۴۰۵/۲/۹

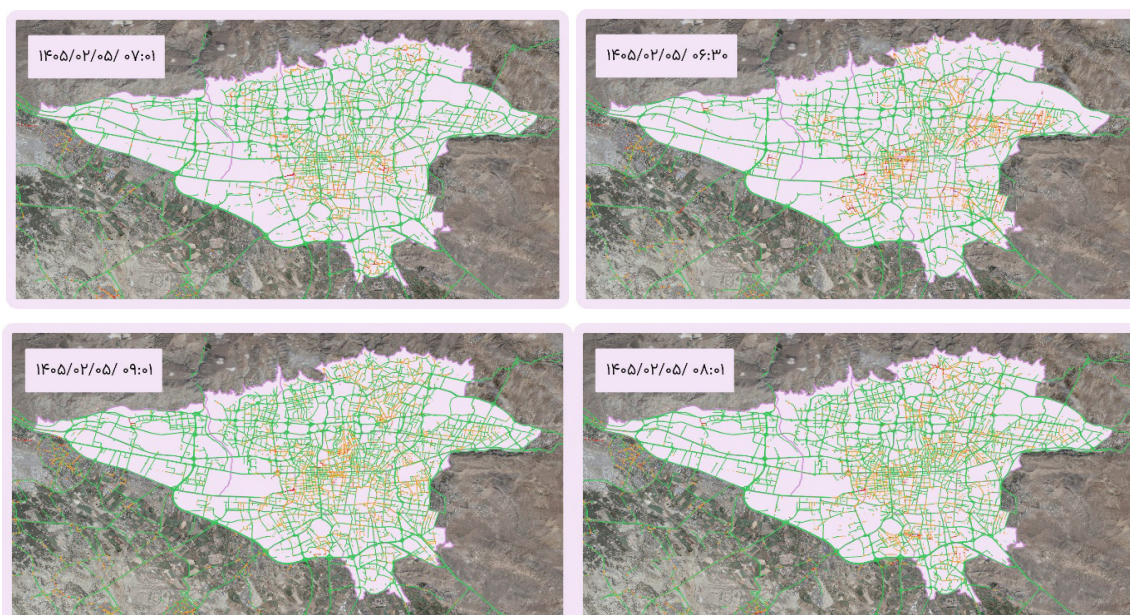
ترافیک	تعداد معبر	درصد
مسدود	۱۴۶۹۵۲	۱.۸۵٪
بسیار سنگین	۱۰۳۶۴۲	۱.۳۰٪
سنگین	۴۲۳۱۷۳	۵.۳۳٪
نسبتاً روان	۱۷۹۵۲۴۸	۲۲.۵۹٪
روان	۵۴۷۶۳۸۱	۶۸.۹۳٪
جمع کل	۷۹۴۵۳۹۶	۱۰۰.۰۰٪

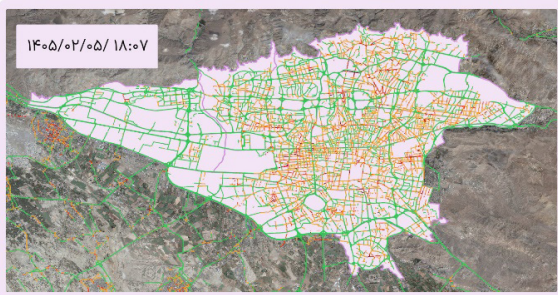
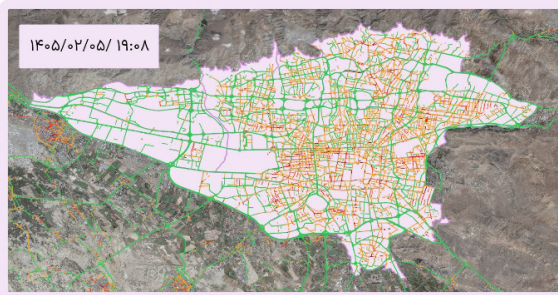
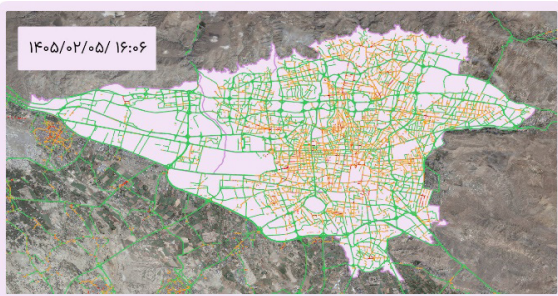
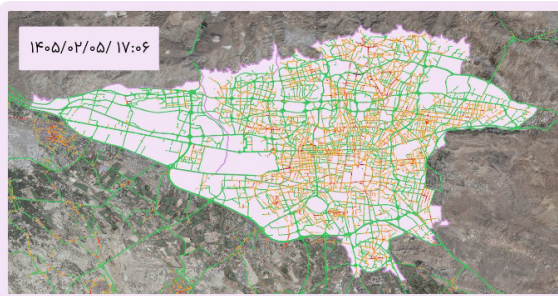
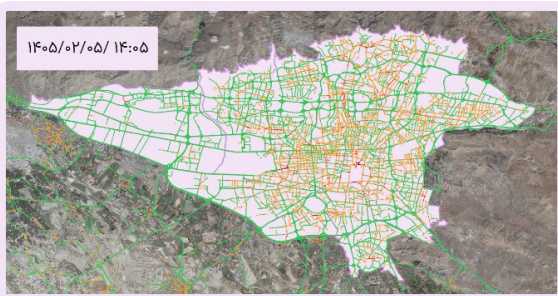
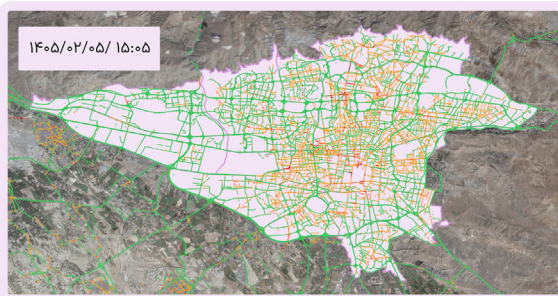
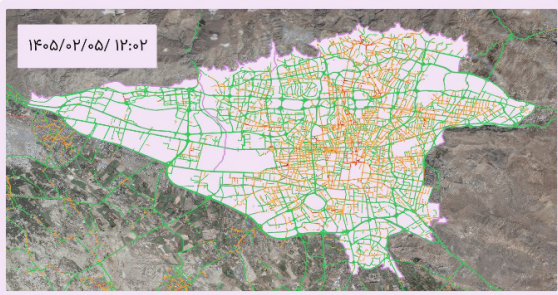
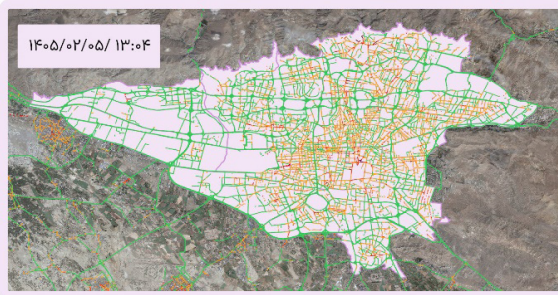
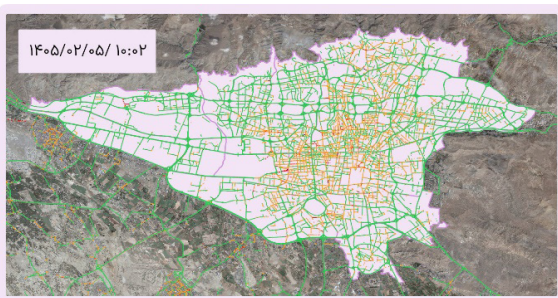
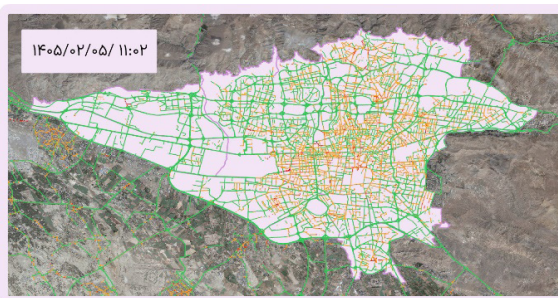


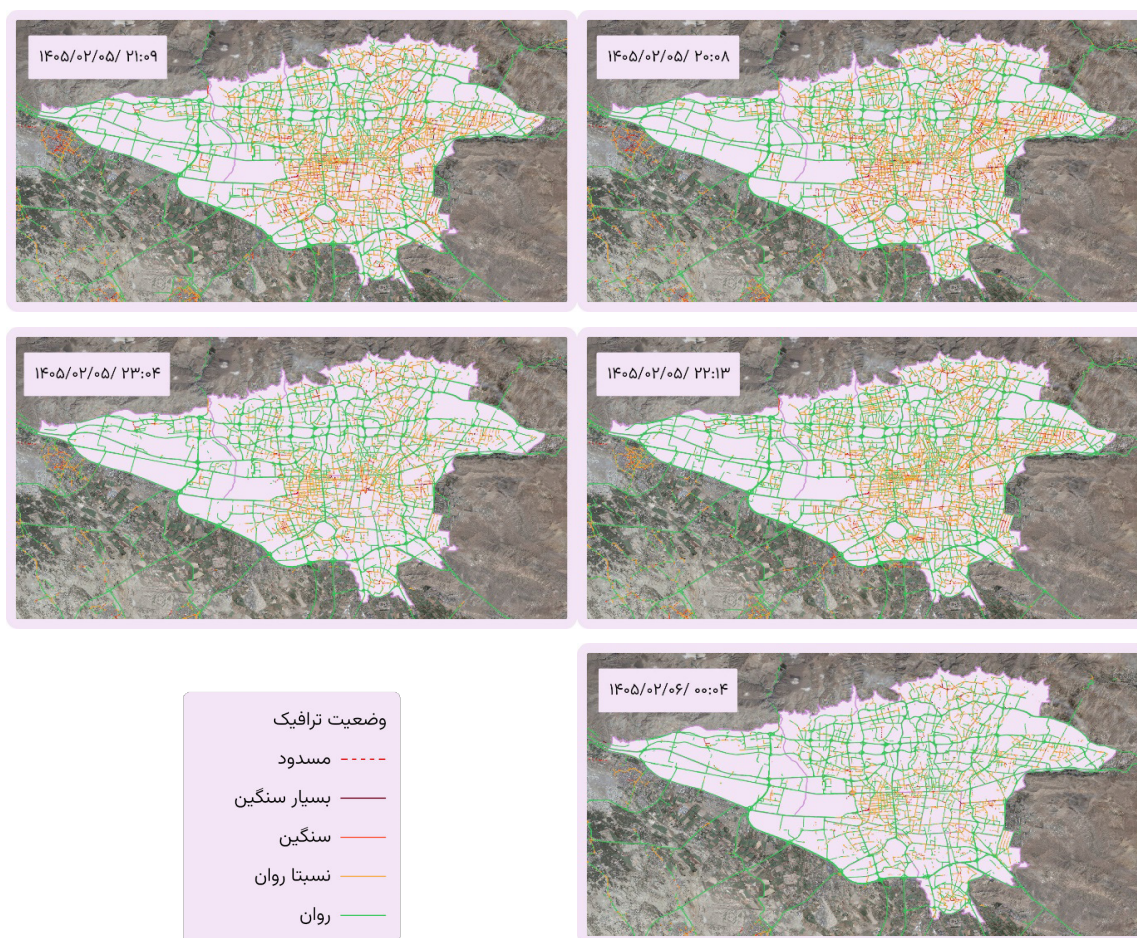
شکل ۵. وضعیت ترافیک معابر تهران

حجم و تراکم ترافیک در معابر شهر تهران متفاوت است، براساس تحلیل صورت گرفته حدود ۶۸/۹۳ درصد معابر طی دوره ترافیکی روان دارد. ۲۲/۵۹ درصد معابر از ترافیک نسبتاً روان برخوردارند، اما سنگین دارند که نشان دهنده تفاوت در ترافیک نوع معبر است که در ادامه به الگوهای فضایی آن بیشتر خواهیم پرداخت (جدول ۲).

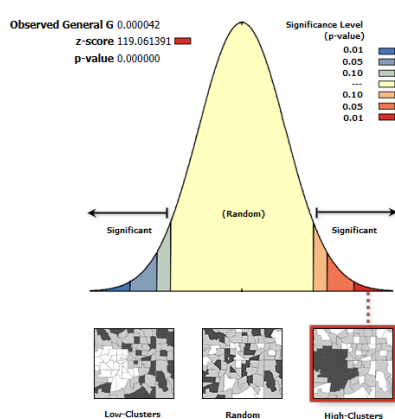
حجم و تراکم ترافیک در معابر شهر تهران متفاوت است، براساس تحلیل صورت گرفته حدود ۶۸/۹۳ درصد معابر طی دوره ترافیکی روان دارد. ۲۲/۵۹ درصد معابر از ترافیک نسبتاً روان برخوردارند، اما سنگین دارند که نشان دهنده تفاوت در ترافیک نوع معبر است که در ادامه به الگوهای فضایی آن بیشتر خواهیم پرداخت (جدول ۲).



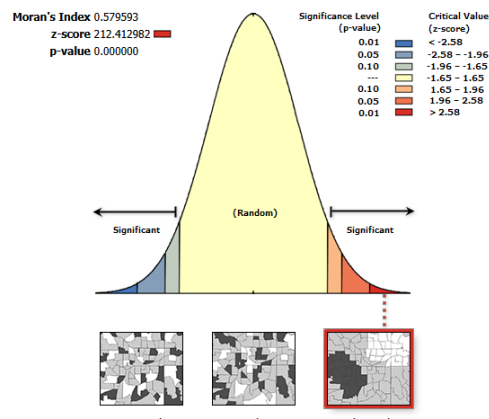




شکل ۶. وضعیت ترافیک معابر شهر تهران در روز شنبه ۱۴۰۵/۰۲/۰۵ (نمونه)



شکل ۸. نمودار خوشه‌های کم/زیاد ترافیک شهر تهران



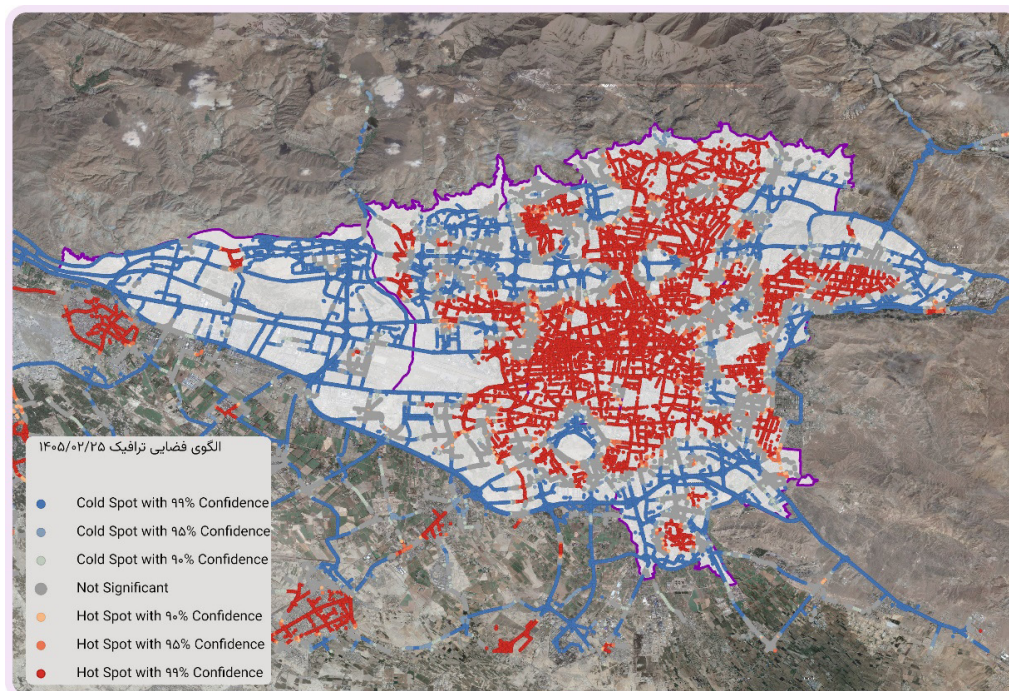
شکل ۷. نمودار اموران ترافیک شهر تهران

ترافیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تا ساعت ۲۴ بامداد را نشان می‌دهد. شکل ۶ داده‌های خام ترافیک است که تغییرات ترافیک را نشان می‌دهد. برای درک این موضوع که آیا داده‌های تراکم ترافیکی دارای الگوی فضایی هستند و یا به صورت تصادفی پراکنده شده‌اند، ابتدا از شاخص موران استفاده شده است که الگوی

تراکم ترافیک پدیده‌ای پویا است و به صورت لحظه‌ای تغییر می‌یابد، در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز وضعیت ترافیکی شهر تغییر می‌یابد، برای شناخت بهتر به صورت نمونه روز شنبه مورخ ۱۴۰۵/۲/۵ به عنوان نمونه انتخاب شده و وضعیت ترافیک از ساعت ۶:۳۰ دقیقه بامداد که هم‌زمان با شروع طرح ترافیک است و الگوی

ترافیکی مقادیر بزرگ یا داده‌های ترافیکی با مقادیر بزرگ تشکیل خوشه داده‌اند (شکل ۸). این داده‌ها اطلاعات خوبی به ما می‌دهند. البته لازم است با استفاده از ابزارهای تحلیل فضایی الگوهای محلی خوشه‌ها را نیز شناسایی کرد. برای این منظور، از تحلیل فضایی نقاط داغ استفاده شده است که به طور کلی سه محدوده قابل شناسایی است. نقاط داغ که نشان‌دهنده محدوده‌های با حجم ترافیک سنگین و خیلی است. دوم نقاط سرد است که محدوده‌های با حجم ترافیک روان را نشان می‌دهد.

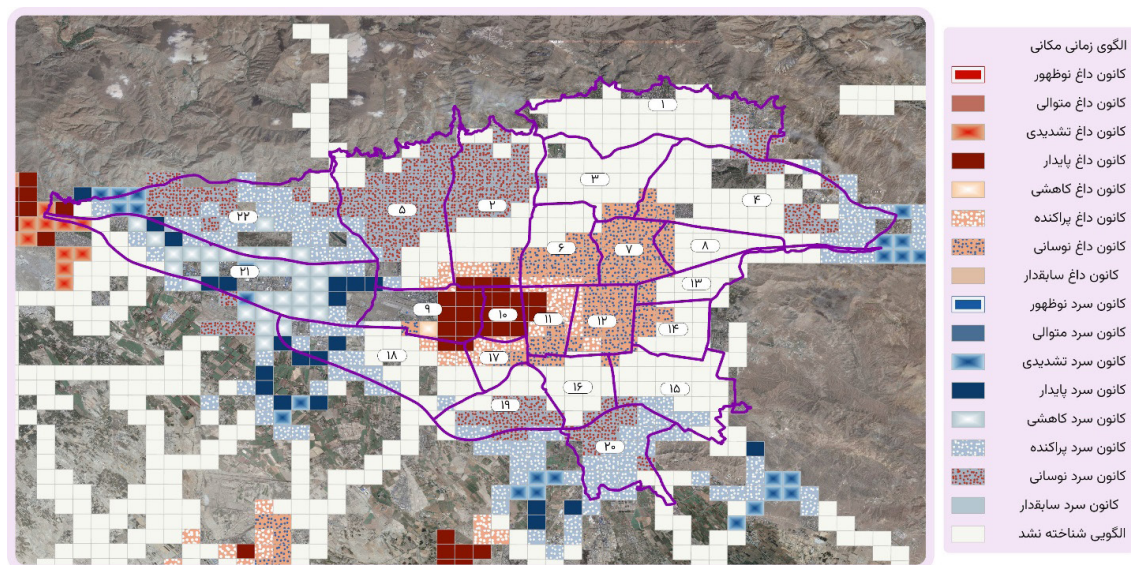
پراکندگی فضایی تراکم ترافیکی را به صورت سراسری نشان می‌دهد. براساس یافته‌های تحقیق میزان z_score تحلیل برای با ۲۱۲/۴۱ است که از مقدار ۲/۵۸ بسیار بزرگ‌تر است که نشان‌دهنده همبستگی فضایی داده‌های تراکم ترافیک است و تشکیل خوشه داده‌اند (شکل ۷). برای درک اینکه چه مقادیری تشکیل خوشه داده‌اند از تحلیل سراسری خوشه‌بندی کم/زیاد استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار شاخص z_score مثبت است لذا الگوی فضایی که از شاخص به دست می‌آید، نشان می‌دهد داده‌های ترافیکی تشکیل خوشه بزرگ داده‌اند. به بیانی، در داده‌ها الگوی



شکل ۹. الگوی فضایی تراکم ترافیک شهر تهران

تهران، گامی اساسی در جهت مداخلات هدفمند، تخصیص بهینه منابع و اتخاذ سیاست‌های مبتنی بر شواهد محسوب می‌شود. برای دستیابی به این هدف با استفاده از داده‌های نقطه‌ای تراکم ترافیک، مکعب فضایی - زمانی ساخته شد و براساس آن به کمک الگوریتم و ابزار تحلیلی EHSA الگوهای فضایی - زمانی مورد کاوش قرار گرفت. خروجی نهایی این مرحله در قالب نقشه‌ای با ۸ کلاس متمایز فضایی به دست آمد. این نقشه، تصویری جامع و چندلایه از وضعیت کنونی، روند گذشته و جهت‌گیری آینده ترافیک را مدل‌سازی می‌کند.

کاوش الگوهای فضایی - زمانی پدیده‌های شهری، از کلیدی‌ترین رویکردهای نوین در مطالعات برنامه‌ریزی و مدیریت کلان‌شهرها به شمار می‌رود. در این میان، تکنیک تحلیل نقاط داغ نوظهور EHSA به عنوان یکی از ابزارهای پیشرفته و قدرتمند داده‌کاوی فضایی، با ترکیب هم‌زمان دو بعد مکان و زمان، امکان شناسایی الگوهای پنهان، روندهای تشدیدشونده و کانون‌های در حال تغییر را فراهم می‌آورد. این روش روند تحولات زمانی این کانون‌ها را نیز در قالب الگوهای مفهومی متمایز (نظیر پایدار، نوسانی، تشدید، تضعیف و پراکنده) طبقه‌بندی می‌کند. شناسایی دقیق این الگوها در پهنه



شکل ۱۰. الگوی زمانی-مکانی کانون‌های ترافیکی شهر تهران

می‌توان گفت که این مناطق هنوز داغ هستند، ولی در حال نزدیک شدن به وضعیت عادی هستند. این الگو ۰/۱ درصد محدوده تراکم ترافیکی را شامل شده و در جنوب فرودگاه مهرآباد در محلات سراسیاب مهرآباد و فتح قابل مشاهده است. نوع دیگر الگوی فضایی نقاط داغ الگوی داغ پراکنده است، به طوری که گاه‌به‌گاه (بدون الگوی زمانی مشخص) کانون داغ شده و سپس محو می‌شود. این الگو ۳/۶۴ درصد محدوده ترافیکی را شامل می‌شود و اغلب به صورت حاشیه‌ای و حلقه‌ای حول محدوده داغ پایدار است که شرایط گذار را دارد و محدوده‌هایی از مناطق ۲، ۵، ۱۱، ۱۲، ۱۷ و ۱۸ را در بر می‌گیرد. الگوی دیگر که بخش قابل توجهی از واحدهای فضایی را به خود اختصاص می‌دهد، الگوی نقاط داغ نوسانی است که به صورت منظم یکی‌درمیان داغ و یک دوره عادی و مجدد الگوی کانونی داغ دیده می‌شود. این الگو در شرق، شمال شرقی و تا حدودی جنوب محدوده داغ پراکنده و در محدوده‌های مناطق ۱۱، ۱۲، ۱۷ و به صورت جزئی در مناطق ۱۴، ۱۳، ۸، ۴، ۳، ۱۶ و ۱۷ واقع شده است. ۷/۶۱ درصد واحدهای فضایی ترافیکی شهر را پوشش می‌دهد و یک رینگ گذار از منطقه تراکم مرکزی شهر تهران است. کانون داغ سابقه‌دار یا تاریخی یکی از الگوهای فضایی است که در گذشته کانون داغ بوده (نیمی از بازه‌های اولیه)، ولی در بازه‌های اخیر (نیمی دوم) دیگر کانون داغ نقاط داغ نیست. این الگو در محدوده ترافیکی شهر تهران وجود ندارد.

کانون‌ها یا نقاط سرد: به الگوی فضایی اشاره دارد که در آن بین مقدار یک واحد فضایی و همسایگان آن رابطه وجود داشته و مقادیر آن‌ها از میانگین کل کمتر است و تشکیل قطب یا کانون مقادیر کوچک می‌دهند. در این نمونه الگوی نقاط سرد، کانون تراکم ترافیک کمتر از میانگین کل را منعکس می‌سازد. این الگو به چند بخش تقسیم می‌شود:

کانون سرد نوظهور: واحدهای که اخیراً میزان تراکم خود را از دست داده و در دوره‌های قبل معمولاً کانون سرد معنادار نبوده است. این الگو در دوره مورد مطالعه در تهران وجود نداشته است. کانون سرد متوالی محدوده‌ای است که چند دوره متوالی به طور معنادار سرد بوده است. این الگو در محدوده شهر تهران شناسایی نشد. الگوی

شکل ۱۰ الگوی نقاط داغ نوظهور (EHSA) شهر تهران را نشان می‌دهد. در این تصویر الگوهای زمانی-مکانی متنوعی را می‌توان دید که نشان‌دهنده پویایی فضایی پدیده مورد بررسی در مناطق ۲۲ گانه کلان‌شهر تهران است. الگوها به دو دسته اصلی کانون‌های سرد و کانون‌های داغ تقسیم می‌شوند که در ادامه به آن می‌پردازیم:

کانون‌ها یا نقاط داغ: به الگوی فضایی اشاره دارد که در آن بین مقدار یک واحد فضایی و همسایگان آن رابطه وجود داشته و مقادیر آن‌ها از میانگین کل بیشتر است و تشکیل قطب یا کانون مقادیر بزرگ می‌دهند. در این نمونه الگوی نقاط داغ، کانون تراکم ترافیک بالاتر از میانگین کل را منعکس می‌سازد این الگو به چند بخش تقسیم می‌شود:

یکی از الگوهای نقاط داغ، کانون داغ نوظهور است که در آن واحدهای ترافیکی تنها در بازه‌های زمانی انتهایی دوره، به کانون پرترافیک تبدیل شده‌اند و قبل از آن وضعیت عادی داشته‌اند. این الگو در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد. الگوی دیگر، کانون داغ متوالی است و منظور واحدهای ترافیکی هستند. چندین بازه زمانی متوالی کانون پرترافیک بوده و هنوز داغ است، اما روند صعودی یا نزولی محسوسی ندارد. این الگو نیز در محدوده شهر تهران در بازه مورد مطالعه شناسایی نشد. الگوی بعدی، کانون داغ تشدید است. در این الگو شدت ترافیک به صورت مداوم افزایشی بوده و شیب در سری زمانی مثبت است. به بیانی، در بستر زمان مقدار G_i^* در هر دوره زمانی نسبت به قبل آن افزایشی است. این الگو را می‌توان در ترافیک شهر تهران، انتهای غربی مناطق ۲۱ و ۲۲ مشاهده کرد. ۱/۳ درصد واحدهای فضایی از این الگوی ترافیکی تبعیت می‌کنند. کانون داغ پایدار یکی دیگر از الگوها است. ویژگی این الگو آن است که تغییرات تراکم ترافیک از ابتدا تا انتهای دوره به طور مداوم کانون داغ بوده و روند کاهشی یا افزایشی ندارد، ۴/۰۸ درصد شهر تهران با این الگو مواجه است. در بخش عمده منطقه ۱۰، بخش شرقی منطقه ۹ و بخش غربی منطقه ۱۱ همیشه با ترافیک سنگین مواجه می‌شویم و شاهد الگوی کانون داغ پایدار هستیم. کانون داغ کاهشی، به الگوی اشاره دارد که قبلاً بسیار داغ بوده است، ولی روند نزولی دارد (به بیانی، ترافیک در حال کاهش است). همچنین،

بر اساس این اصل، حدود ۲۰ درصد معابر، ۸۰ درصد بار ترافیکی شهر را تحمل می‌کنند (Zhao, Wu, Ren, Ji, & Qian, 2019).

تحلیل الگوی خودهمبستگی فضایی: نتایج شاخص موران با مقدار z-score برابر با ۲۱۲/۴۱ (بسیار بزرگ‌تر از مقدار بحرانی ۲/۵۸) به صورت قاطع نشان می‌دهد توزیع تراکم ترافیک در تهران از الگوی تصادفی پیروی نمی‌کند، بلکه همبستگی فضایی مثبت و خوشه‌ای دارد. این یافته با نتایج مطالعات مشابه در کلان‌شهرهایی نظیر پکن (Liu, Sun, Sun, & Gao, 2017)، استانبول (Kaygisiz, Düzgün, 2015) و همسو است که همگی نشان داده‌اند ترافیک شهری پدیده‌ای خودهمبسته فضایی است. مثبت بودن Z-score در تحلیل خوشه‌بندی کم/زیاد نیز مؤید آن است که این خوشه‌بندی عمدتاً ناشی از تجمع مقادیر بالای ترافیک در کنار یکدیگر است؛ یعنی معابر پرتراffic به جای پراکندگی، در کنار یکدیگر قرار گرفته و کانون‌های بزرگ ترافیکی را شکل داده‌اند. این الگوی خوشه‌ای را می‌توان با نظریه مرکز - پیرامون (Friedmann, 1966) و مدل‌های شهر تک‌مرکزی (Alonso, 1964) تبیین کرد. ساختار فضایی تهران که بر محوریت مرکز شهر و گسترش شعاعی آن شکل گرفته است، باعث شده تا جریان‌های روزانه سفر به صورت همگرا به سمت مرکز جریان یابند و خوشه‌های ترافیکی فشرده‌ای را در این محدوده ایجاد کنند.

تحلیل الگوهای فضایی - زمانی نوظهور (EHS): مهم‌ترین یافته‌های تحلیلی این تحقیق براساس نتایج EHS است که نشان می‌دهد ۴۰/۸ درصد ترافیک شهر تهران دارای کانون داغ پایدار هستند. موقعیت این محدوده بسیار حائز اهمیت است. محدوده‌ای که شامل بخش عمده منطقه ۱۰، شرق منطقه ۹ و غرب منطقه ۱۱ می‌شود که منطبق با هسته مرکزی - غربی تهران است. این محدوده از نظر بافت شهری دارای بافت فشرده، قدیمی و گاه با معابر کم عرض شناخته می‌شود، از نظر کاربری در این محدوده مخلوطی از انواع کاربری‌های مسکونی، تجاری، اداری متراکم وجود دارد و از نظر دسترسی، محل تلاقی چند بزرگراه و معبر اصلی شهر تهران است. علاوه بر جمعیت ساکن در این منطقه، به دلیل استقرار بازارها و مراکز اداری دارای جمعیت شنواری بالایی است که روزها به بخش مرکزی شهر سفر می‌کنند و بعد از ظهر از این مناطق خارج می‌شوند. البته شایان یادآوری است بخشی از الگوی ترافیکی ساعت ۲۰ به بعد در معابر اصلی و به‌ویژه مرکز شهر تهران ناشی از گردهمایی‌ها و تجمعات شبانه ایران است.

یکی از نتایج مهم دیگر مقاله، الگوی ترافیکی کانون‌های داغ تشدید است هرچند به طور دقیق براساس داده‌های یک‌هفته‌ای نمی‌توان چنین برداشتی داشت، با این حال می‌توان تأکید کرد شناسایی الگوی کانون داغ تشدید در انتهای غربی مناطق ۲۱ و ۲۲ به میزان ۱/۳ درصد است. این الگو نشان می‌دهد این محدوده در حال گذار از وضعیت عادی به سمت بحران ترافیکی است. توسعه سریع شهری در مناطق غربی تهران طی دو دهه اخیر، به‌ویژه با احداث شهرک‌های مسکونی بزرگ نظیر شهرک چیتگر، دریاچه شهدای خلیج فارس و توسعه منطقه ۲۲، جمعیت قابل توجهی را به این نواحی جذب کرده و بار ترافیکی عمده‌ای را در معابر اصلی و بزرگراه‌های غرب تهران ایجاد کرده است.

الگوی داغ نوسانی (۷/۶۱ درصد) و داغ پراکنده (۳/۶۴ درصد) در مجموع ۱۱/۲۵ درصد ترافیک شهری نشان می‌دهد این الگو عمدتاً به صورت حلقه‌ای گرد کانون داغ پایدار مرکزی توزیع شده‌اند و یا

دیگر کانون سرد تشدید است، ناحیه سردی که طی زمان سردی آن قوی‌تر شده است (ترافیک روان‌تر شدت گرفته است). این الگو ۲/۹۸ درصد، واحدهای فضایی ترافیکی را پوشش می‌دهد. این الگو اغلب در حاشیه‌های شهر تهران در شرقی‌ترین قسمت منطقه ۴، در غرب تهران در محله شریف، جنوب تهران در محدوده شهرک رسالت واقع شده است. الگوی دیگر، کانون سرد پایدار است. در این الگو واحد فضایی ترافیکی بیشتر/کل بازه زمانی به طور معناداری همواره سرد است. این الگو ۲/۳۲ درصد واحدهای فضایی را در بر می‌گیرد. این الگو در محدوده شهر تهران اغلب در غرب تهران در محدوده شهرداری منطقه ۲۱ به صورت محدود واقع شده و بخش‌هایی از محلات ویلاشهر، شهرک غزالی، دانشگاه تهران، پاسداران، شهرک فرهنگیان - آزادی را در بر گرفته است. الگوی نقاط سرد کاهشی، واحدهای فضایی هستند که در آن کانون روان بودن ترافیک در حال تضعیف شدن بوده و به سمت الگوهای نیمه‌سنگین حرکت می‌کند. این الگو ۳/۶۴ درصد محدوده مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. از نظر جغرافیایی، این الگو منطقه ۲۱ شهرداری تهران را تقریباً به طور کامل پوشش می‌دهد. الگوی سرد پراکنده ۱۳/۳۴ درصد ترافیک تهران را در بر می‌گیرد و منطقه ۲۲، منطقه ۲۰، شرق منطقه ۴ در محله حکیمیه و محله مشیریه در منطقه ۱۵، بخش‌هایی از منطقه ۱۸ را شامل می‌شود. الگوی سرد نوسانی، سرد و یا روان بودن در آن حالت نوسانی دارد. به بیانی، بین دوره‌های سرد و حالت کمتر سرد (یا برگشت به نزدیک متوسط) حالت رفت‌وبرگشتی دارد. این الگو ۱۱/۵۸ درصد تهران را پوشش می‌دهد و شامل محدوده‌های حاشیه‌ای شهر تهران در مناطق ۵، ۲، محله‌های سرو آزاد، دریاچه شهدای خلیج فارس در منطقه ۲۲ و محله قاسم‌آباد ده نارمک، کوهسار، گلشن، تهرانپارس شرقی، جوادیه در منطقه ۴، محلات جوانمرد قصاب، دولت‌آباد در منطقه ۲۰ و جنوب منطقه ۱۹ را در بر می‌گیرد.

۶. بحث و تفسیر یافته‌ها

یافته‌های پژوهش حاضر که بر پایه تحلیل بیش از ۷/۹ میلیون نمونه ترافیکی طی ۲۵۹ بازه زمانی نیم‌ساعته در شهر تهران طی یک دوره یک‌هفته‌ای به دست آمده است، تصویری چندلایه و پویا از ساختار فضایی - زمانی ترافیک ارائه می‌دهد. در این بخش، یافته‌ها در چهار محور اصلی شامل ساختار کلی ترافیک، خودهمبستگی فضایی، الگوهای نقاط داغ و سرد نوظهور (EHS) و دلالت‌های برنامه‌ریزی مورد بحث و تفسیر قرار می‌گیرد.

تحلیل ساختار کلی و توزیع ترافیک در شهر تهران: یافته‌های توصیفی نشان می‌دهد ۶۸/۹۳ درصد معابر شهر تهران طی دوره مورد مطالعه در وضعیت ترافیک روان قرار داشته‌اند و تنها حدود ۶/۶۳ درصد (مجموع ترافیک سنگین و بسیار سنگین) در وضعیت بحرانی بوده‌اند. به بیانی، توزیع وضعیت ترافیکی معابر شهر تهران شهر تهران را نشان می‌دهد، به طوری که ۶۸/۹۳ درصد معابر در وضعیت روان، ۲۲/۵۹ درصد نسبتاً روان، ۵/۳۳ درصد سنگین، ۱/۳۰ درصد بسیار سنگین و ۱/۸۵ درصد نیز مسدود هستند. هرچند، سهم بالای ترافیک روان ممکن است تصویری مطلوب از وضعیت ترافیکی شهر ارائه دهد، اما باید توجه داشت که حجم بالای جابه‌جایی و بار ترافیکی معمولاً در تعداد محدودی از معابر اصلی و شریانی متمرکز است. این پدیده با آنچه در ادبیات برنامه‌ریزی حمل‌ونقل به عنوان قانون پارتو در شبکه‌های ترافیکی شناخته می‌شود، هم‌راستا است

مشارکت نویسندگان

نویسندهٔ اول ۱۰۰ درصد.

تشکر و قدردانی

مقاله حامی مادی و معنوی ندارد.

تعارض منافع

موردی از سوی نویسنده گزارش نشده است.

منابع

- Alonso, W. (1964). *Location and land use: Toward a general theory of land rent*. Harvard University Press. <https://isbsearch.org/isbn/9780674729568>
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Barbosa, H., Barthelemy, M., Ghoshal, G., James, C. R., Lenormand, M., Louail, T., Ronaldo Menezes, José J. Ramasco, Filippo Simini, & Marcello Tomasini, M. (2018). Human mobility: Models and applications. *Physics Reports*, 734, 1–74. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.01.001>
- Cheng, T., Haworth, J., Anbaroglu, B., Tanaksaranond, G., & Wang, J. (2014). Spatiotemporal data mining. In M. M. Fischer & P. Nijkamp (Eds.), *Handbook of Regional Science* (pp. 1173–1193). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://isbsearch.org/isbn/9783642234309>
- Den Hoed, W. (2024). The unfinished cycling city: Embedding age-inclusion in urban cycling futures. *Urban, Planning and Transport Research*, 12(1), 2335195. <https://doi.org/10.1080/21650020.2024.2335195>
- Friedmann, J. (1966). *Regional development policy: A case study of Venezuela*. The University of California: M.I.T. Press. <https://isbsearch.org/isbn/9780262560025>
- Getis, A., & Ord, J. K. (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1992.tb00261.x>
- Hägerstrand, T. (1970). What about people in regional science? *Papers in Regional Science*, 24(1), 7–21. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1970.tb01464.x>
- Han, J. W., Kamber, M., & Pei, J. (2011). *Data mining: Concepts and techniques* (3rd ed ed.). Berlin, Germany: Morgan Kaufmann Publishers. <https://isbsearch.org/isbn/9780123814807>
- Kaygisiz, Ö., Düzgün, Ş., Yildiz, A., & Senbil, M. (2015). Spatio-temporal accident analysis for accident prevention in relation to behavioral factors in driving: The case of South Anatolian Motorway. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behavior*, 33, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.07.002>
- Kerner, B. S. (2002). Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks. *Physical Review E*, 65(4). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.046138>
- Kerner, B. S. (2004). *The physics of traffic: Empirical freeway pattern features, engineering applications, and theory*. Springer. <https://isbsearch.org/isbn/9783662078928>
- Kerner, B. S., Rehborn, H., Aleksic, M., & Haug, A. (2004). Recognition and tracking of spatial-temporal congested traffic patterns on freeways. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 12(5), 369–400. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.07.015>

الگوی گذار از مرکز شهر به سمت بیرون را نشان می‌دهد که در آن، نواحی اطراف هستهٔ مرکزی شهر، به عنوان مناطق گذار شناخته می‌شوند. نوسانی بودن ترافیک در این محدوده‌ها، نشان‌دهندهٔ حساسیت بالای این نواحی به متغیرهای ساعتی و روزانه است نظیر ساعت‌های اوج رفت‌وآمد، روزهای هفته که بر نقش زمانمندی در شکل‌گیری الگوهای فضایی تأکید دارند.

۷. نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تحلیل الگوهای فضایی - زمانی تراکم ترافیک در کلان‌شهر تهران و با بهره‌گیری از رویکرد نوین تحلیل نقاط داغ و سرد نوظهور (EHSA) بر پایهٔ مکعب فضا - زمان و با بهره‌گیری از منابع برخط وب انجام شد. تحلیل بیش از ۷/۹ میلیون رکورد تراکم ترافیکی طی ۲۵۹ بازه زمانی نیم‌ساعته در بازهٔ زمانی یک‌هفته‌ای، تصویری جامع، چندلایه و پویا از ساختار ترافیکی تهران ارائه داد که می‌توان مهم‌ترین یافته‌های آن را در شش محور اصلی خلاصه کرد: نخست، تحلیل توصیفی نشان داد از نظر فضایی تراکم در کانون‌های مشخصی متمرکز شده و از نظر زمانی در ساعت‌های اوج، بار سنگینی بر کل شبکه تحمیل می‌کند. این یافته مصادقی از قانون پارتو در ترافیک شهری است. دوم، نتایج تحلیل خودهمبستگی فضایی شاخص موران اثبات کرد که توزیع ترافیک در تهران تصادفی نیست و از یک ساختار خوشه‌ای قوی پیروی می‌کند. مثبت بودن z-score در تحلیل خوشه‌بندی کم/زیاد نیز نشان داد پرتراکمی در تهران یک پدیدهٔ انتشار فضایی است و کانون‌های پرتراکم بر واحدهای فضایی مجاور اثر سرریز فضایی می‌گذارند. سوم، تحلیل EHSA هشت الگوی متمایز فضایی - زمانی را آشکار ساخت. چهارم، مهم‌ترین یافتهٔ هشداردهندهٔ پژوهش، شناسایی الگوی داغ تشدید در غرب تهران (مناطق ۲۱ و ۲۲) است که نشان می‌دهد ترافیک این محدوده روند صعودی معناداری دارد و در آستانهٔ تبدیل شدن به کانون بحرانی آینده قرار دارد. پنجم، جمع‌بندی الگوهای شناسایی شده، یک ساختار فضایی چهارحلقه‌ای هم‌مرکز را در ترافیک تهران آشکار کرد. ششم، تطابق یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات مشابه در کلان‌شهرهای لندن، پکن و سایر شهرهای بزرگ جهان، اعتبار روش‌شناختی EHSA را در محیط شهری تهران تأیید می‌کند و نشان می‌دهد این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار استاندارد برای تحلیل ترافیک کلان‌شهرها به کار گرفته شود. با توجه به یافته‌ها و محدودیت‌های تحقیق، لازم است تأکید شود که داده‌های مورد استفاده در این پژوهش، شامل یک بازه زمانی کوتاه‌مدت (۷ روز) از داده‌های آنلاین و برخط است. از دیدگاه روش‌شناختی، این بازه زمانی برای استخراج الگوهای ترافیکی فصلی یا روندهای بلندمدت ساختاری کافی نیست و نمی‌توان نتایج آن را مستقیم به عنوان یک نمایندهٔ جامع از رفتار ترافیکی تهران طی یک سال تقویمی در نظر گرفت. بنابراین، این پژوهش را می‌توان یک مطالعهٔ پیلوت و مقطعی دانست که هدف اصلی آن اثبات مفهومی روش‌شناختی، شناسایی الگوهای نوظهور و تمرکز بر تغییرات لحظه‌ای و پدیده‌های گذرا که در مطالعات بلندمدت با میانگین‌گیری ممکن است نادیده گرفته شوند. لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی بازه‌های بلندمدت در نظر گرفته شود تا الگوهای بلندمدت و قابل اطمینان حاصل شود.

- Komarovsky, S., & Haddad, J. (2025). Spatio-temporal graph convolutional neural network for traffic signal prediction in large-scale urban networks. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 32, 101482. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101482>
- Lanorte, A., Nolè, G., & Cillis, G. (2024). Application of the Getis-Ord correlation index (Gi) for burned area detection improvement in Mediterranean ecosystems (Southern Italy and Sardinia) using Sentinel-2 data. *Remote Sensing*, 16(16), 2943. <https://doi.org/10.3390/rs16162943>
- Liu, X., Sun, L., Sun, Q., & Gao, G. (2017). Spatial variation of taxi demand using GPS trajectories and POI data. *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1). <https://doi.org/10.1155/2020/7621576>
- Mitchell, A. (2009). *The Esri guide to GIS analysis* (second edition), Vol. 2: Spatial Measurements and Statistics, Esri Press. <https://isbnsearch.org/isbn/9781589486089>
- Mohammed, S., Alkhereibi, A. H., Abulibdeh, A., Jawarneh, R. N., & Balakrishnan, P. (2023). GIS-based spatiotemporal analysis for road traffic crashes; in support of sustainable transportation Planning. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 20, 100836. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100836>
- Ord, J. K., & Getis, A. (1995). Local spatial autocorrelation statistics: Distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, 27(4), 286–306. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00912.x>
- Peng, H., Shen, N., Cui, A., Cheng, H., & Li, J. (2019). Spatio-temporal pattern of crime in the context of rapid urbanization: A case study in Shenzhen, China. *Applied Geography*, 103, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2019.01.002>
- Shekhar, S., Jiang, Z., Ali, R. Y., Eftelioglu, E., Tang, X., Gunturi, V. M. V., & Zhou, X. (2015). Spatiotemporal data mining: A computational perspective. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, 4(4), 2306–2338. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2018.2866809>
- Soltani, A., & Roohani Qadikolaei, M. (2024). Space-time analysis of accident frequency and the role of built environment in mitigation. *Transport Policy*, 150, 189–205. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.02.006>
- Treiber, M., & Kesting, A. (2013). *Traffic flow dynamics: Data, models, and simulation*. Springer. <https://isbnsearch.org/isbn/9783642324604>
- Van Wageningen-Kessels, F., van Lint, H., Vuik, K., & Hoogendoorn, S. (2015). Genealogy of traffic flow models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(4), 445–473. <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>
- Zhang, D., Lan, H., Wang, M., Yu, J., Jiang, X., & Zhang, S. (2025). Graph convolutional networks with multi-scale dynamics for traffic speed forecasting. *Applied Soft Computing*, 174, 112966. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112966>
- Zhao, X., Wu, Y. P., Ren, G., Ji, K., & Qian, W. W. (2019). Clustering analysis of ridership patterns at subway stations: A case in Nanjing, China. *Journal of Urban Planning and Development*, 145(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000468](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000468)
- Zhu, L., Zhang, Q., Jian, X., & Yang, Y. (2025). Graph convolutional network for traffic incident duration classification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 151, 110570. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110570>

